

## CONTROL APLICADO A SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA MARINA

Facundo Mosquera, Carolina Evangelista, Paul Puleston

Instituto LEICI, UNLP-CONICET, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata, Argentina  
[facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar](mailto:facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras clave:** Modos Deslizantes de Segundo Orden, Energías Marinas, Máxima Extracción de Potencia

### 1. Introducción

Los océanos son una gran fuente de energía renovable, la cual se almacena en forma de energía térmica, química y cinética en olas y mareas. Dispositivos acoplados a generadores eléctricos son los encargados de recolectar la energía disponible en las corrientes de mareas y en las olas, por otro lado, las plantas de potencia osmótica y los generadores termoeléctricos aprovechan los gradientes salinos y térmicos presentes en el mar. La Figura 1 muestra el incremento en la capacidad instalada de estos sistemas en los últimos años [1].



Figura 1: Capacidad Instalada de Energía

### 1.1. Energías del mar

#### a. Mareas

La energía mareomotriz es la que resulta de aprovechar las mareas. Es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la Tierra y la Luna, y que es producto de la atracción gravitatoria de esta última y el Sol sobre las masas de agua en los mares.

Esta diferencia de alturas puede aprovecharse fabricando un dique similar a los hidráulicos, pero con turbinas que funcionen en ambos sentidos. La desventaja es que la implementación con barreras en estuarios cambia la hidrología y modifica el ecosistema.



Figura 2: La Rance – Francia

#### b. Corrientes Marinas

El hecho de que la marea sea altamente predecible es una gran ventaja para un recurso renovable y lo posiciona por sobre el solar y el eólico en cuanto a la predictibilidad. En esencia, las corrientes marinas de mareas pueden predecirse con un 98% de exactitud por décadas.

A diferencia del aprovechamiento en la energía mareomotriz, que utiliza la energía potencial de las mareas, la explotación hidrocinética se centra en extraer la energía cinética de las corrientes que se producen debido al movimiento de masa de agua de las mareas. La manera de aprovecharla es mediante turbinas de eje horizontal. Este concepto tiene la ventaja de ser escalable y de provocar un impacto reducido al medioambiente donde se instala.



Figura 3: Seagen – Irlanda

### c. Olas

La energía Undimotriz es la que proveen las ondas marinas. Estas se forman, principalmente, a partir de la presión que ejercen los vientos sobre las capas superficiales de agua en el mar. Existe una gran variedad de dispositivos diseñados para captar esta energía, uno de ellos, Figura 4.



Figura 4: Pleamis - Portugal

### d. Gradiente Térmico

La energía maremotérmica o Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC) obtiene energía a partir de la diferencia de temperaturas entre las aguas oceánicas profundas, más frías y las superficiales, más cálidas.

Pese a tener un rendimiento bajo en comparación con otras energías del mar, su aplicación puede ser rentable, debido a que está continuamente funcionando gracias a que en las zonas tropicales la temperatura del año se mantiene día y noche, todo el año. El principio de funcionamiento es mover una turbina con vapor a alta presión, el líquido más utilizado es el amoníaco que tiene un punto de fusión a baja temperatura ya que la temperatura superficial del agua en zonas tropicales ronda los 27°. El sistema funciona con intercambiadores de calor que evaporan el líquido y lo condensan. Una planta piloto puede verse en la Figura 5.



Figura 5: Makai - Hawaii

### e. Gradiente Salino

Este tipo de generación se basa en aprovechar los gradientes salinos que se generan en las interfaces entre el agua salada y dulce, el agua de mar y de río. Las principales técnicas para transformar el gradiente salino en energía son Osmosis de Presión Retardada y Electrodialísis Reversible, para ambos procesos es crítica la membrana que separa el agua dulce de la salada.

## 1.2. Panorama Nacional

Argentina tiene un gran potencial para el desarrollo de sistemas de aprovechamiento Hidrocinético y Undimotriz. En cuanto a la primera, la mínima velocidad requerida para una instalación rentable de una turbina está estimada en 1m/s [2], en la costa patagónica se registran corrientes promedio por encima de ese valor, tal como puede observarse en la Figura 6.

Por otro lado, los parámetros que definen el potencial Undimotriz son la altura promedio de ola y su periodo. Estos parámetros son prometedores en la provincia de Buenos Aires, particularmente entre Punta Médanos y Quequén, tal como puede observarse en la Figura 7.

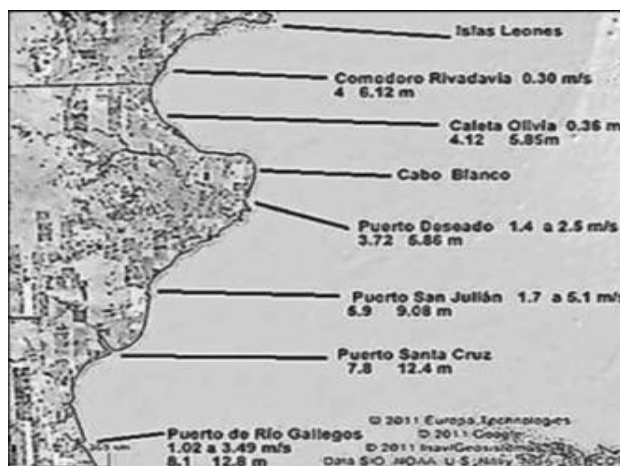


Figura 7: Velocidades de Corrientes

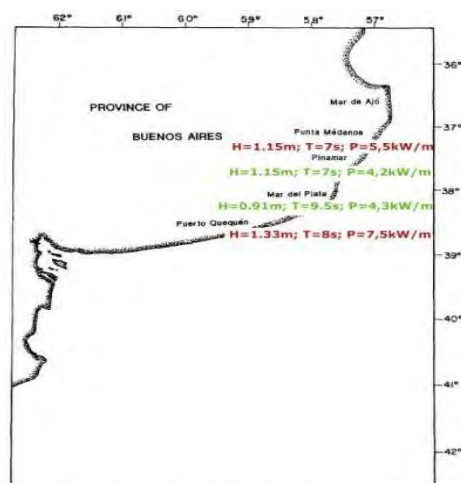


Figura 6: Parámetros de olas

Donde  $H$  es la altura promedio de ola,  $T$  el período promedio y  $P$  la potencia promedio por metro de frente de ola [3].

Debido al gran potencial que la bibliografía expone para la argentina en corrientes marinas y olas, en el presente trabajo se propone el control de un sistema que maximiza la energía hidrocínética y otro sistema que aprovecha la energía Undimotriz.

## 2. Aportes, Resultados y Discusión

### 2.1. Control de Sistemas de Aprovechamiento de Corrientes Marinas

Como caso de estudio, se propone el diseño de un controlador sencillo y robusto para maximizar la extracción de potencia de un sistema basado en una turbina de corriente marina que mueve un Generador Síncrono de Imán Permanente (PMSG por sus siglas en inglés), sin control de *pitch*, conectado a red a través de un convertidor en estator. Además de las características ya mencionadas, esta topología permite operar a velocidad variable, generando a la frecuencia fijada por la red; el convertidor puede ser regulado electrónicamente en un amplio rango para elegir puntos de operación deseados. Un diagrama esquemático del sistema se presenta en la Figura 8.

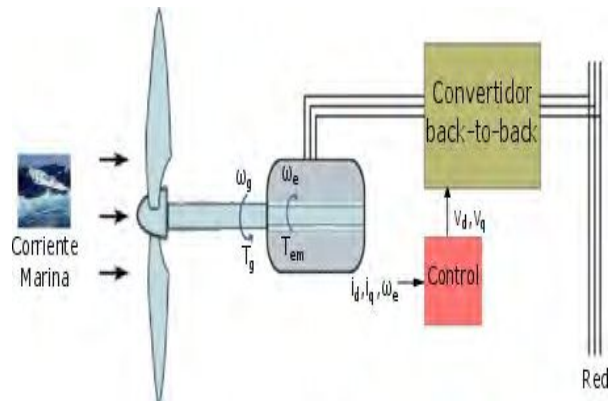


Figura 8: Diagrama Control

#### a. Modelo del sistema y objetivos de control

Considerando un sistema de transmisión rígido, la dinámica mecánica queda adecuadamente representada por la velocidad de rotación mecánica,  $\omega_g$ , en tanto que la dinámica eléctrica puede describirse a través de las componentes directa y en cuadratura (d-q) de las corrientes del PMSG en un marco rotante sincrónico,  $i_d$  e  $i_q$ :

$$L_d \dot{i}_d(t) = -R_s i_d(t) + \omega_e(t) L_q i_q(t) + v_d(t)$$

$$L_q \dot{i}_q(t) = -R_s i_q(t) - \omega_e(t) (L_d i_d(t) + \Phi_m) + v_q(t)$$

$$J \dot{\omega}_g(t) = T_g(\nu, \omega_g) - T_{em}(i_d, i_q)$$

En esta propuesta se contempla como objetivo principal realizar una estrategia de seguimiento de los puntos de operación de máxima potencia. Así, se plantean como objetivos de control:

- Maximizar la potencia capturada, controlando los puntos de operación de manera que  $T_{em} = T_{g\text{opt}}$ .
- Mantener la corriente  $i_d(t)$  en cero. De esta manera, se minimizan las pérdidas eléctricas en el cobre y se disminuye el *ripple* del par, contribuyendo así a reducir la fatiga mecánica del sistema y aumentando su vida útil.

#### b. Modos Deslizantes y Variables de deslizamiento

Las técnicas de control por modos deslizantes se basan en definir una función de los estados, la variable de deslizamiento  $\sigma$  que típicamente son una función del error, de tal manera que el objetivo de control deseado se cumpla cuando Los algoritmos Modo Deslizante de Segundo Orden garantizan la convergencia y permanencia en cero de  $\sigma$  y de su primera derivada temporal,  $\dot{\sigma}$ , generalmente en tiempo finito y con una acción de control discontinua actuando sobre la segunda derivada temporal de  $\sigma$ . La condición  $\dot{\sigma} = 0$  determina la llamada superficie de deslizamiento en el espacio de estados.



Para el caso de estudio, las variables de deslizamiento se definen como sigue:

$$\sigma_1 = i_d(t) - i_{dref}(t) = i_d(t)$$

$$\sigma_2 = T_{em} - T_{gopt} = \frac{3}{2} p_p \Phi_m i_q(t) - k_o \omega_e^2(t).$$

Para cumplir con los objetivos de control, se empleará el algoritmo Super-Twisting, cuya ley es la siguiente [4]:

$$u_i^* = -k_{i1} |\sigma_i|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma_i) - k_{i2} \int_0^t \text{sign}(\sigma_i) dt$$

### c. Resultados de simulación

A continuación se presentan y comentan algunos resultados representativos obtenidos por simulación del sistema controlado según la propuesta presentada. Se trabajó con una turbina de 1,52MW [5]. En la Figura 9, puede observarse en línea continua el seguimiento de los puntos de operación óptimos (línea punteada), sobre las curvas características de la turbina para distintas velocidades de corriente (líneas a trazos).

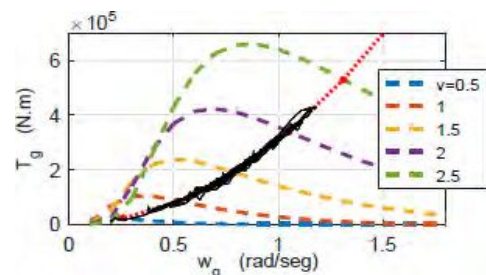


Figura 9: Seguimiento de Par

En la Figura 10 se muestra la potencia extraída, junto con la curva de máxima potencia extraíble. Se observa un leve retardo entre ambas debido a la inercia del sistema, característico de la estrategia de seguimiento de par propuesta, que tiene la ventaja de no requerir medición de velocidad de corriente.

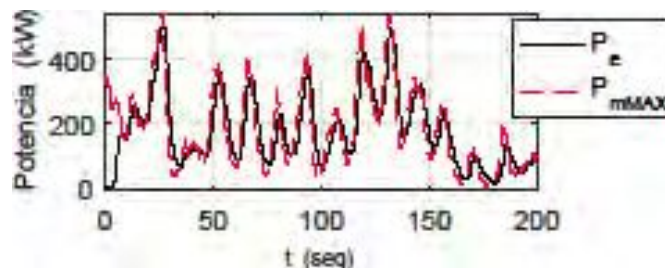


Figura 10: Potencia de Salida

## 2.2. Control de Sistemas de Aprovechamiento Undimotriz

Una de las formas de aprovechar energía hidrodinámica de las olas es transformándola en un flujo de aire oscilante mediante un dispositivo de Columna de Agua Oscilante (OWC por sus siglas inglés) como el de la Figura 11.

El sistema OWC está compuesto por una estructura hueca sólida que cuenta con un orificio ubicado debajo de la superficie del mar, esto permite que las ondas de las olas entren y salgan de la cámara. Esta estructura puede ser fija y estar colocada en la orilla, o ser flotante y estar colocada en aguas profundas. La acción de las olas comprime y descomprime el aire atrapado dentro de la cámara lo que fuerza al flujo a pasar por la turbina generando energía de rotación. Debe notarse que el flujo de aire en la cámara es bidireccional dependiendo de si

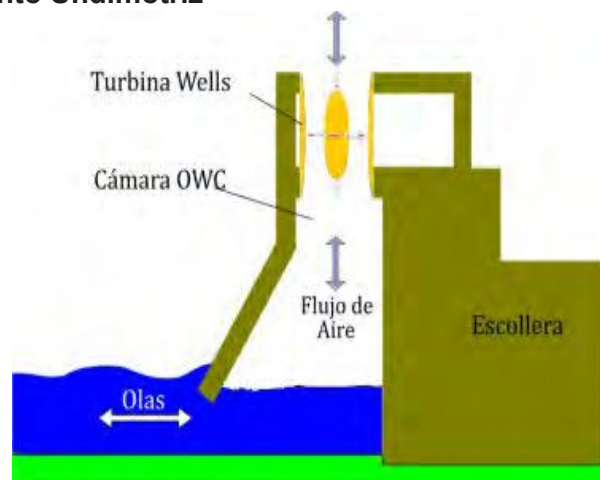


Figura 11: Diagrama OWC

la ola está golpeando al sistema o si está siendo reflejada. En este sentido, para producir una rotación unidireccional continua del generador eléctrico, se utiliza una turbina Wells [6]. Este dispositivo es una turbina de baja presión de aire que, independientemente de la dirección del flujo, siempre rota en la misma dirección. A la turbina se la acopla a un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG por sus siglas en inglés) para generar electricidad.

#### a. Modelo del sistema y objetivos de control

El comportamiento dinámico del sistema palas-eje-generador se describe de manera aproximada con tres ecuaciones diferenciales que describen la dinámica eléctrica del rotor y la dinámica mecánica de la velocidad de rotación:

$$\begin{aligned}\dot{i}_{qr} &= -\left(\frac{L_m V_s}{L_{eq}} + \omega_s i_{dr}\right) \left(\frac{p\Omega_r}{\omega_s} - 1\right) - \frac{R_r L_s i_{qr}}{L_{eq}} + \frac{L_s v_{qr}}{L_{eq}} \\ \dot{i}_{dr} &= \omega_s i_{qr} \left(1 - \frac{p}{\omega_s} \Omega_r\right) - \frac{R_r L_s i_{dr}}{L_{eq}} + \frac{L_s v_{dr}}{L_{eq}} \\ \dot{\Omega}_r &= \frac{1}{J} \left(T_t(\nu, \Omega_r) - \frac{3pL_m V_s}{2\omega_s L_s} i_{qr}\right)\end{aligned}$$

Los objetivos de control para este sistema son:

- Maximizar la potencia activa extraída del sistema.
- Regular la potencia reactiva entregada a la red.

#### b. Modos Deslizantes y Variables de deslizamiento

El sistema Undimotriz también es controlado mediante MDSO, por lo que es necesario definir las variables de deslizamiento. Para el objetivo de control de maximizar la potencia activa del sistema se definió:

$$\sigma_1 = \Omega_{ref} - \Omega_r$$

Consecuentemente, para cumplir con el objetivo de control de regular la potencia reactiva entregada a la red, se definió:

$$\sigma_2 = Q_{ref} - Q = Q_{ref} - \frac{3pV_s^2}{2\omega_s L_s} + \frac{3pL_m V_s}{2L_s} i_{dr}$$

Se diseñaron dos controladores por MDSO, considerando para  $\sigma_1$  un controlador basado en el algoritmo de *Twisting* y para  $\sigma_2$  un controlador basado en el algoritmo *Super-Twisting*.

El algoritmo *Twisting* responde a la siguiente ley [7]:

$$v_{qr}(\sigma) = -r_1 \cdot \text{sign}(\sigma) - r_2 \cdot \text{sign}(\dot{\sigma}) \quad , r_1 > r_2 > 0$$

El algoritmo *Super-Twisting* responde a la siguiente ley [7]:

$$v_{drST}(\sigma) = -\beta_{ST} |\sigma|^{1/2} \text{sign}(\sigma) - \alpha_{ST} \int_0^t \text{sign}(\sigma(\tau)) d\tau$$

#### c. Resultados de simulación

Para realizar las simulaciones se consideró un clima de olas promedio conocido a partir de información disponible sobre la ciudad de Quequén, Buenos Aires, Argentina [3].

El controlador *Twisting* es el que regula la velocidad del rotor en el DFIG, para seguir la referencia planteada y mantener al sistema en el punto de operación óptimo. El control de potencia activa fue comparado con propuestas de otros autores, los resultados de simulación pueden observarse en la Figura 12, donde la figura roja es la asociada a la propuesta de esta publicación.

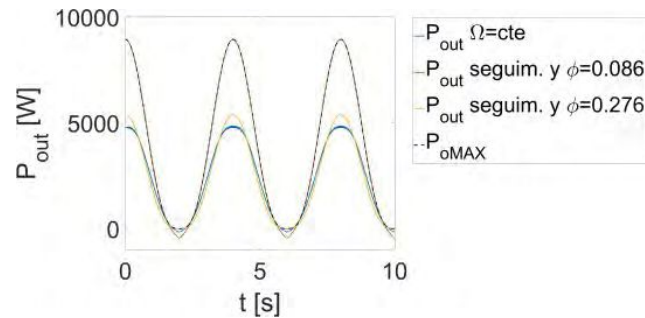


Figura 12: Potencia Activa

Para simular el comportamiento del sistema al regular potencia reactiva se mantuvo la referencia en 0var y a los 4 segundos de simulación se cambió a 1kvar. En la Figura 13 se observan la potencia reactiva generada por el DFIG y, en línea segmentada, la referencia que el control propuesto logra seguir satisfactoriamente. Dentro de la figura se realizó una ampliación para poder apreciar tanto el pequeño sobrepaso, el veloz tiempo de convergencia que tiene el sistema al variar la referencia y el *chattering* de la salida.

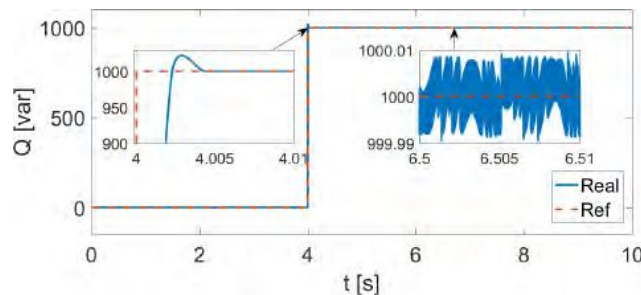


Figura 13: Potencia Reactiva

### 3. Conclusiones y Líneas Futuras

En el presente trabajo se introducen las distintas fuentes de energía provistas por el mar, mostrándose en particular que la extracción de energía de las olas y las corrientes de mareas es de gran interés a nivel internacional y su capacidad instalada crece año a año. Además, se observó que en las costas argentinas existe gran potencial para la explotación de estos últimos recursos.

Por estos motivos, se propuso el desarrollo de controladores por modos deslizantes de segundo orden para la maximizar la extracción de potencia de dos sistemas típicos para corrientes marinas y olas, respectivamente. A partir de esta propuesta se estableció que los controladores diseñados son robustos para cumplir los objetivos de control deseados. Así mismo, el método propuesto para sistemas de columna de agua oscilante incrementa considerablemente el rendimiento de conversión respecto de los alcanzados por otros autores.

### 4. Referencias

- [1] OES, "Annual Report 2017," *Annual Report*, p. 154, 2017.
- [2] IET, *Electrical Design for Ocean Wave and Tidal Energy Systems.*, 2013.
- [3] Lanfredi, *Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina*. La Plata: Pergamon, 1992.
- [4] Levant, "Sliding order and sliding accuracy is sliding mode control," vol. 58, no. 6, 1993.
- [5] Zhou, "Power control of a nonpitchable PMSG-based marine current turbine at overrated current speed with flux-weakening strategy," vol. 40, no. 3, 2015.
- [6] Falcao, "Oscillating Water Column wave energy converters and air turbines: A review," 2016.
- [7] Shtessel, *Sliding Mode Control and Observation*. New York: Springer, 2013.